

Szerves folyadékokkal telített talajok hidraulikus vezetőképessége I. Összehasonlító vizsgálatok

MAKÓ ANDRÁS

Pannon Agrártudományi Egyetem, Keszthely

Bevezetés

Csővezetékek és tárolótartályok meghibásodása miatt, közúti, légi vagy vasúti balesetek következményeként nagy mennyiségű, vízben oldhatatlan szerves folyadék kerülhet a felszíni és felszín alatti talajrétegekbe. A szennyeződések vándorlása és további sorsa szerint megkülönböztethetjük a víznél kisebb fajlagos tömegű szerves folyadékokat (pl. benzin, kerozin, gázolaj) és a víznél nagyobb fajlagos tömegűeket (pl. különböző klórozott szénhidrogének). A talajok elszennyeződése szempontjából - az okozott károk mértékét tekintve - az első csoportba tartozó folyadékok (a kőolaj és a belőle előállított üzem- és fűtőanyagok) a fontosabbak. A kőolaj és származékai a telítetlen talajrétegeken átszivárogva elérhetik a talajvizet, majd a talajvíztükör felületén úszó lencse alakjában az áramló talajvízzel együtt vándorolhatnak.

A talajokat szennyező kőolajszármazékok talajokba szivárgásának, illetve a talajvízzel együtt történő vándorlásának becslésére számos matematikai modellt fejlesztettek ki (LENHARD et al., 1988; CARY et al., 1989; KALUARACHCHI & PARKER, 1989; FAUST et al., 1989; KUEPER & FRIND, 1991; PANTAZIDOU & SITAR, 1993; ESSAID et al., 1993; WEAVER et al., 1994; HEIJDE, 1994). Valamennyi modell lényeges input paramétere a vizsgált talajréteg hidraulikus vezetőképessége, mely paraméter jól jellemzi a talaj szerkezeti állapotát, porusviszonyait, vízgazdálkodási tulajdonságait.

A talaj hidraulikus vezetőképességét befolyásoló tényezők

A talaj hidraulikus vezetőképessége alatt a folyadékkal teljesen telített (két-fázisú) talajban az időegység alatt egységnyi keresztmetszeten egységnyi hidrosztatikai nyomás hatására átszivárgott folyadék mennyiségét értjük, mely a Darcy-egyenlet K értékének felel meg:

$$q = K \cdot H / L \quad (1)$$

ahol: q az egységnyi idő alatt egységnyi keresztmetszeten átszivárgott folyadék mennyisége és H/L a hidraulikus gradiens (BAVER, 1959).

A hidraulikus vezetőképességet (vagy áteresztőképességet) a talajok és az átszivárgó folyadékok tulajdonságai együttesen határozzák meg. A talajok hidraulikus vezetőképességét befolyásoló tényezők vizsgálatával bőséges szakirodalom foglalkozik.

A *talajtulajdonságok* közül a talajok *porozitáviszonyai* tekinthetők a legfontosabbnak, mégpedig elsősorban nem az összporozitás, hanem a pórusok méret szerinti megoszlása és térbeli elrendeződése (differenciált porozitás) (GARCIA-BENGOCHEA et al., 1979). A porozitáviszonyokat kialakító és befolyásoló talajparaméterek egy része az adott talaj esetében állandónak tekinthető (mechanikai összetétel, részecskék alakja és felszíne, ásványi összetétel), más része viszont időben változhat (talaj folyadékkal való telítettsége, szerkezete, tömődöttsége stb.).

A talajok folyadékáteresztő képességét befolyásolja a talajrészecskék *méret szerinti megoszlása*, különösképpen a finomabb részecskék aránya (BENSON et al., 1994). Minél kisebbek a részecskék, általában annál kisebbek a köztük lévő pórusok, így tehát a csökkenő részecskemérettel csökken az áteresztő képesség is.

GAL és munkatársai (1990) keveréksorokon végzett kísérleteikben igazolták az agyagtartalom növekedésének a hidraulikus vezetőképességet csökkentő hatását. Kis mennyiségű agyag homok + por mintával történő összekeverése ugyanakkor a minta szerkezetének fellazulásán keresztül porozitás- és hidraulikus vezetőképesség-növekedést okozott.

A *részecskék alakja és felszíne* is befolyásolja a hidraulikus vezetőképességet. Minél megnyújtottabb vagy szabálytalanabb a részecske, annál kanyargósabb a folyadékáramlás útvonala és minél durvább felszínű a részecske, annál nagyobb a súrlódás a folyadékok áramlása során. Mindkét tényező csökkenti a folyadékáramlás sebességét, illetve a hidraulikus vezetőképességet (HEAD, 1984).

Nehezebb mechanikai összetételű talajokban a részecskék *ásványi összetétele* is döntő lehet az áteresztőképesség szempontjából. Egyrészt a táguló rétegrácsú agyagásványok duzzadása során jelentősen változhatnak a pórusviszonyok, másrészt a különböző típusú ásványok különböző vastagságú adszorpciós folyadékhártyák kialakítására képesek, miáltal szintén megváltozik a talajokban a pórustér méret szerinti megoszlása. (A folyadékfázis egy része a folyadékhártyák alakjában immobilá válik, a vezetésben résztvevő pórusok mennyisége csökken.) Ezzel magyarázható az a tapasztalat, hogy nagy agyagtartalmú mintákban az ásványi összetétel nagyobb hatással lehet az áteresztőképességre,

mint a részecskék mérete. (Hasonló a tapasztalat a nagy Na^+ -telítettségű talajoknál is.) Homokos vagy kavicsos talajokban az ásványi összetétel hatása az áteresztőképességre minimális (HEAD, 1984).

Hasonló víztelítettségű és agyagtartalmú, de különböző agyagásvány összetételű minták hidraulikus vezetőképessége vízre az alábbi sorrendben növekedett: szmektit (montmorillonit) < attapulgit < illit < kaolinit (MITCHELL, 1976).

Az eddigiekben felsorolt talajparaméterek adott talaj esetében közel állandónak tekinthetők. Ezzel szemben egyazon típusú talaj *tömődöttsége* tág határok között változhat. A talajok nagyobb tömődöttsége elsősorban a nagyméretű, gravitációs pórusok csökkenését eredményezi, miáltal lényegesen csökken a hidraulikus vezetőképesség.

Különösen kiterjedt kutatások folynak e témakörben a különféle célból (pl. hulladéktároló szigetelése) alkalmazott, tömörített agyagszigetelésekkel kapcsolatban (MITCHELL et al., 1965; BOYNTON & DANIEL, 1985; BENSON et al., 1994).

A hidraulikus vezetőképesség fogalmának meghatározásakor feltételként szerepelt a talaj *folyadékkal való teljes telítettsége*.

Az esetlegesen a mintában maradó légbuborékok elzárják a részecskék közötti "folyadékcsatornákat", miáltal csökken a talaj áteresztőképessége. 85 %-nál kisebb folyadéktelítettség esetén már feltételezhető, hogy összefüggő levegőfázis van jelen a rendszerben. Ilyen feltételek között a Darcy-törvény nem tekinthető többé érvényesnek.

A gyakorlatban a hidraulikus vezetőképesség mérése során a nagy agyagtartalmú és/vagy nagy Na^+ -tartalmú minták folyadékkal történő teljes telítése okozhat gondot (MITCHELL et al., 1965; VÁRALLYAY, 1972, 1973).

A talajok *természetes szerkezete* szoros kapcsolatban van porozitásukkal és ezen keresztül a folyadékáteresztő képességükkel. A különféle humusz- és agyagkolloidok hatására kialakuló makro- és mikroaggregátumok növelik a talaj hidraulikus vezetőképességét.

Az eredeti szerkezetű talajokban található repedések, kiválások, szerves maradványok, gyökér- és állatjáratok következtében nagyságrendekkel térhetnek el az ugyanazon talajféleségen mért hidraulikus vezetőképesség értékek. Nagyobb mintaátmérő esetében a szerkezeti rendellenességek statisztikai valószínűsége, és ezáltal a mérhető hidraulikus vezetőképesség értéke is nagyobb (BOYNTON & DANIEL, 1985).

Amennyiben légszáraz, őrölt és átrostált talajmintából készített mesterséges talajoszlopokon végeznek hidraulikus vezetőképesség méréseket, a természetes szerkezetből adódó heterogenitások részben kiküszöbölhetők. A mesterséges talajoszlopokkal végzett mérések eredményei főként talaj- vagy folyadékparaméterek hatását vizsgáló összehasonlító-vizsgálatokban hasznosak, ugyanakkor az eredmények abszolút értékben a szabadföldi állapotokra nem adaptálhatók,

mivel a mesterséges talajoszlopok általában nem tükrözik a talajok természetes porozításvizonyait (FIREMAN, 1944).

A talajokban található, kevésbé aggregálódott, lazán kötődő ásványszemcsék vagy szerves alkotók a mintára ható *hidraulikus gradiens* nagyságának függvényében az áramló folyadékkal együtt mozoghatnak (MITCHELL, 1976). Vándorlásuk során eltömíthetik a minta pórusait vagy éppen - kimosódva a mintából - növelhetik annak porozitását, melynek következményeként időben változhat a minta hidraulikus vezetőképessége.

Agyagos talajokban az átszivárgó folyadék hatására bekövetkező diszperzió szintén mozgékony ásványszemcsék kialakulásához vezet. Amennyiben az agyagrészecskék a rendszerből kimosódnak, az agyaghártyájuktól megszabadult durvább szemcsék közötti pórusokban a hidraulikus vezetőképesség értéke megnő (ALPEROVITCH et al., 1985).

Hasonlóképpen, a hidraulikus gradiens növekedésével nő a nagy duzzadó agyagásvány-tartalmú és/vagy erősen Na^+ -telített talajok hidraulikus vezetőképessége annak következtében, hogy a növekvő hidraulikus gradiens hatására az erősen kötött, a vezetésben addig részt nem vevő folyadékfázis egyre nagyobb hányada mobilizálódik (VÁRALLYAY, 1972).

Az átszivárgó *folyadékok minőségét* tekintve a folyadékok *fajlagos tömegével* egyenes, (dinamikus) *viszkozitásával* fordított arányosságot mutat a hidraulikus vezetőképesség (KOZÉNY, 1927), feltételezve, hogy az áramló folyadék nem változtatja meg kémiaiag a porózus közeget, illetve hogy a talaj ásványai és a folyadék között semmiféle fizikai és kémiai kölcsönhatás nem lép fel. Mivel a talajokban a részecskeméret csökkenésével, a fajlagos felületek növekedésével a szilárd fázis - folyadék fázis kölcsönhatások erősödnek, az arányosság a durvább fizikai féleségű talajokra jobban, az agyagfrakciót nagyobb mennyiségben tartalmazó talajokra kevésbé érvényes (MITCHELL, 1976).

Szervetlen vegyületeket tartalmazó vizes oldatok agyagos talajokon történő átszivárgása során a szervetlen savak és bázisok, a kicserélhető kationok minősége és koncentrációja módosíthatja a talaj hidraulikus vezetőképességét (YONG et al., 1992).

A szerves savak - a szervetlen savakhoz hasonlóan - reagálnak a talaj karbonáttartalmával és széndioxidot szabadítanak fel. A reakció következtében akár meg is háromszorozódhat a talaj hidraulikus vezetőképessége. Poláros szerves folyadékok (pl. metanol) - a nagy adszorpciós kapacitású agyagásványokat tartalmazó talajmintákban - kétszeresére növelhetik a hidraulikus vezetőképességet (UPPOT & STEPHENSON, 1989).

Apoláros szerves folyadékokkal telített nagy agyagtartalmú talajok apoláros szerves folyadékokkal mért hidraulikus vezetőképessége általában jóval nagyobb, mint a víztelített talajok vízzel mért hasonló értéke. Bár az egyes szerzők véleménye nem egységes abban, hogy a nagyfokú vezetőképesség-növekedés pontosan mivel magyarázható (a talajásványok felületén kialakuló diffúz kettősréteg vastagságának csökkentése révén a "folyadék csatornák" bővülése

vagy a szerves folyadékok és az agyagásványok kölcsönhatása révén kialakuló új flokkulátumokat tartalmazó porózusabb talajszerkezet), azt valamennyien megállapítják, hogy a hidraulikus vezetőképesség változása a folyadékparaméterek közül a legszorosabb összefüggést a folyadékok dielektromos állandójával mutatja (GILLIGAN & CLEMENCE, 1984; FERNANDEZ & QUIGLEY, 1985; UP-POT & STEPHENSON, 1989; BUDHU et al., 1991).

Természetes körülmények között a telített talajok pórusterét többféle, egymással különbözőképpen elegyedő folyadék töltheti ki. Egymással *nem elegyedő folyadékokat* tartalmazó talajok áteresztőképessége az adott folyadékra nézve a talaj adott folyadékra vonatkozó telítettségének a függvénye (TESTA & PACZ-KOWSKI, 1989; PALMER & JOHNSON, 1989, TESTA & WINEGARDNER, 1991).

Szerves folyadékok esetében fontos különbséget tenni a folyadékokkal történő telítés kiindulási körülményei között. Amennyiben légszáraz, agyagban gazdag talajmintát telítenek szerves folyadékkal, az előzőekben leírt nagymértékű hidraulikus vezetőképesség-növekedés tapasztalható: a hidraulikus vezetőképesség és a dielektromos állandó között fordított arányosság mutatkozik. Amennyiben viszont a talaj kezdetben vízzel telített és ezután érintkezik a szerves folyadékkal, a szerves folyadék átszivárgása annál gyorsabb, minél nagyobb a folyadék dielektromos állandója, vagyis minél kevésbé hidrofób a folyadék (YONG et al., 1992).

Az átszivárgó folyadék *hőmérsékletének* emelkedése a folyadék viszkozitásának csökkenését eredményezi. Különösen nagymértékű ez a viszkozitáscsökkenés szerves folyadékok esetében. A mért hidraulikus vezetőképesség értékeket általában korrigálják egy standard hőmérsékletre, melynek elfogadott értéke laboratóriumi kísérleteknél 20 °C, szabadföldi méréseknél 10 °C (HEAD, 1984).

A hőmérséklet a folyadékokban oldott gázok mennyiségén keresztül is hat a hidraulikus vezetőképességre. A hőmérséklet növekedése eredményezheti azt, hogy az áramló folyadék a tökéletlenül telített minta levegőtartalmának egy részét oldja, vagy éppen fordítva, alacsonyabb hőmérsékleten csökken a beoldódás és növekszik a gázfázis aránya. A gázfázis térfogatának változásával viszont változik a minta hidraulikus vezetőképessége (HILLEL, 1971).

Jelentős különbségeket okozhatnak az egyazon talajon mért hidraulikus vezetőképesség értékekben az eltérő *mérési módszerek* is.

Helyszíni, illetve bolygatatlan vagy bolygatott szerkezetű mintákon végzett laboratóriumi mérési módszerek ismereteseek. A talajokat szennyező vegyületek vándorlását és átalakulását vizsgáló környezetvédelmi kutatások során különféle hidrológiai és hidrogeológiai helyszíni mérési módszereket alkalmaznak, hazánkban a legismertebbek az ún. "auger hole" és a piezométeres módszer (US EPA, 1993; VÁRALLYAY, 1993). A helyszíni mérésekkel nyert adatok jellemzően legjobban a természetes körülményeket, ugyanakkor vékonyabb talajrétegek

vizsgálatára, vagy egyéb összehasonlítható vizsgálatokra a laboratóriumi módszerek alkalmasabbak.

A bolygatott vagy bolygatatlan (eredeti szerkezetű) minták hidraulikus vezetőképességének laboratóriumi meghatározására két alapvető módszer áll rendelkezésre: az állandó és a csökkenő folyadéknomás módszere. A különféle tudományágak (talajfizika, hidrogeológia, mérnökgeológia) e két módszer változatos technikai megoldásait használják (VÁRALLYAY, 1973; HEAD, 1984; KLUTE & DIRKSEN, 1986).

Nagy agyagtartalmú talajok, agyagszigetelések stb. hidraulikus vezetőképességének vizsgálatakor gyakran szükséges a porozitásviszonyok (tömődöttség, tömörítettség) és a folyadék áteresztőképesség együttes mérése. Az ún. oedometer teszt merev falú fémggyűrűbe helyezett mintán a csökkenő víznyomás módszerével, az ún. triaxiális teszt rugalmas fallal határolt mintán általában az állandó víznyomás módszerével méri a a tömődöttség függvényében a hidraulikus vezetőképességet (TAVENAS et al., 1983; HEAD, 1984; BOYNTON & DANIEL, 1985).

Közleményünkben bemutatásra kerülő kísérletsorozatban - amelyet az F 013155 OTKA téma keretében végeztünk - a hidraulikus vezetőképességre ható talaj- és folyadék paraméterek hatását vizsgáltuk. A témában végzett előkísérleteink (MAKÓ, 1993; MAKÓ et al., 1995) tapasztalataira támaszkodva különböző, egymástól lényegesen eltérő mechanikai összetételű és agyagásvány-tartalmú ásványi őrlemény- és talajmintákon, valamint ezekből összeállított keveréksorozatok mintáin mértük a hidraulikus vezetőképességet, a mérésekhez desztillált vizet és különböző szerves folyadékokat alkalmazva. Munkánkkal a talajokat szennyező szerves folyadékok mozgását leíró modellek adatbázisát kívántuk bővíteni.

Anyag és módszer

A kísérletekhez használt talajminták és ásványi őrlemények jellemző tulajdonságait; a talajkeveréksorok összetételét; a talaj- és ásványi őrlemény minták ásványi összetételét, valamint a mérésekhez használt folyadékok néhány jellemző fizikai és kémiai tulajdonságát az Agrokémia és Talajtan jelen számában megjelenő közleményünkben (1-4. táblázat) már közre adtuk (MAKÓ et al., 1995).

A minták hidraulikus vezetőképességének meghatározását a csökkenő folyadéknomás módszerével végeztük (VÁRALLYAY, 1993), azzal a változtatással, hogy a bolygatatlan minták gyűjtésére és tárolására szolgáló fém betéthengerek helyett 5 cm átmérőjű 10 cm hosszú üveghengerekben készítettük el a légszáraz, átrostált mintákból a mesterséges talajoszlópokat. A hengerek aljára finomszövésű szövetet illesztettünk, majd gumidugóhoz történő óvatos ütögetés közben töltöttük fel az oszlópokat, oly módon, hogy folyamatosan mértük a talajoszlópok térfogattömegét.

A feltöltés során igyekeztünk az oszlopokon belül és az egyes ismétlések között egyenletes tömődöttséget elérni.

A mesterséges talajoszlopok magassága 8 cm volt (kivéve a kőolajjal végzett méréseket, ahol a hosszú telítési idő miatt csak 4 cm magas talajoszlopokat készítettünk).

Az egyes talaj-, ásványi őrlemény és talajkeverék mintákból 3-3 db oszlopot készítettünk ("*minta ismételés*").

A talajoszlopokat ezután - alulról felfelé - mindig azzal a folyadékkal telítettük, melyre vonatkozóan a minta hidraulikus vezetőképességét később mérni kívántuk.

Egy-egy talajoszloppal három-három hidraulikus vezetőképesség mérést végeztünk ("*mérés ismételés*"). Ilyenkor a folyadékadagoló csövet újra maximumig feltöltöttük és mértük az időegység alatti folyadékszint csökkenéseket. Egy-egy mérés alatt három-három folyadékszint-csökkenést és időkülönbséget regisztráltunk ("*magasság ismételés*").

A talajkeveréksorok esetében a minták desztillált vízre és kerozinra vonatkozó hidraulikus vezetőképességét mértük. A talaj- és ásványi őrlemény minták esetében mind a négy kiválasztott folyadékkal (desztillált víz, kerozin, gázolaj és kőolaj) elvégeztük a méréseket.

A mérések alapján számolt hidraulikus vezetőképesség értékeket varianciaanalízissel értékeltük. Egytényezős varianciaanalízissel (SPSS/PC + V3.0 1988., ONEWAY, Duncan-teszt) összehasonlítottuk egy-egy adott folyadék esetében a talaj- és ásványi őrlemény minták, valamint a talajkeveréksorok egyes elemeinek hidraulikus vezetőképességét. Továbbá - ugyanezzel a módszerrel - összehasonlításokat végeztünk egy-egy adott talajminta esetében a különféle folyadékokkal telített oszlopok hidraulikus vezetőképessége között.

Ugyancsak ezzel a módszerrel összehasonlítottuk az egyes talajoszlopok mért térfogattömegét. Az egymástól igazolhatóan különböző térfogattömegű oszlopokat eltérő kódszámokkal láttuk el, mely kódolást a későbbiekben a tömődöttség hatását kimutató statisztikai vizsgálatainkban használtuk fel.

Az egyes mintákat agyagásvány-féleség alapján is kódoltuk. A kódok alapját ez esetben a montmorillonit-tartalom képezte. A csak illitet, kaolinitet vagy agyagot csak nyomokban tartalmazó minták is különböző kódszámokat kaptak. Ezeket a kódokat az agyagásvány minőség hatását igazoló statisztikai vizsgálatainkban használtuk fel.

Többtényezős varianciaanalízis segítségével (SPSS/PC + V3.0 1988., MANOVA), felhasználva a talajkeveréksorokon mért hidraulikus vezetőképesség eredményeket, vizsgáltuk néhány, a talajokra jellemző változó (tömődöttség, agyagásvány minőség és folyadék minőség) hatását a hidraulikus vezetőképesség értékekre. (A talajok mechanikai összetételének a hidraulikus vezetőképességgel való kapcsolatát következő közleményünkben tanulmányoztuk.) Hasonló statisztikai vizsgálatokat végeztünk a talaj- és ásványi őrlemény minták hidraulikus vezetőképesség értékein is.

Végül megvizsgáltuk, hogy az egyes "ismétléstípusok" ("mintaismétlés", "magasságismétlés", "mérésismétlés") miként befolyásolják a mérési eredményeket.

Az eredmények ismertetése

Hidraulikus vezetőképesség méréseink eredményeit az 1-2. táblázatban foglaljuk össze. Az 1. táblázat a talajkeveréksorok hidraulikus vezetőképességét hasonlítja össze egytényezős variancia-analízis segítségével. A feltüntetett hidraulikus vezetőképességi értékek a különféle ismétlések együttes átlagai. A mellettük található betűjelek az egyes oszlopokon belüli összehasonlításra szolgáló Duncan-teszt jelölései (A különféle betűkkel jelzett minták hidraulikus vezetőképessége az adott folyadékra és mintacsoportra vonatkoztatva a teszt alapján szignifikánsan eltérő [$P=5\%$]).

1. táblázat

A hidraulikus vezetőképesség mérések eredményei (talajkeveréksorok)

(1) Minta jele	(2) Hidraulikus vezetőképesség (m/s)		(1) Minta jele	(2) Hidraulikus vezetőképesség (m/s)	
	(3) Desztillált víz	(4) Kerozin		(3) Desztillált víz	(4) Kerozin
A. I. Keveréksor			C. I-II. keveréksor		
I/1	8,25E-09 g	9,26E-07 c	I/1	8,25E-09 i	9,26E-07 c
I/2	3,58E-08 f	4,54E-07 e	I/2	3,58E-08 f	4,54E-07 e
I/3	4,04E-08 f	3,16E-07 f	I/3	4,04E-08 f	3,16E-07 f
I/4	3,52E-08 f	2,69E-07 g	I/4	3,52E-08 f	2,69E-07 g
I/5	7,88E-08 e	2,48E-07 g	I/5	7,88E-08 e	2,48E-07 g
I/6	1,43E-07 d	5,42E-07 d	I/6	1,43E-07 d	5,42E-07 d
I/7	2,22E-06 c	3,95E-06 b	I-II/7	2,22E-06 c	3,95E-06 b
I/8	7,24E-06 b	3,32E-06 b	I-II/8	7,24E-06 b	3,32E-06 b
I/9	0,0001 a	5,29E-05 a	I-II/9	0,0001 a	5,29E-05 a
B. II. Keveréksor			II/1	1,63E-08 h	3E-06 b
II/1	1,63E-08 g	3E-06 b	II/2	2,71E-08 fg	5,74E-07 d
II/2	2,71E-08 ef	5,74E-07 d	II/3	1,81E-08 hg	5,2E-07 d
II/3	1,81E-08 fg	5,2E-07 d	II/4	1,48E-08 h	5,51E-07 d
II/4	1,48E-08 g	5,51E-07 d	II/5	3,6E-08 f	5,87E-07 d
II/5	3,6E-08 e	5,87E-07 d	II/6	6,76E-08 e	1,18E-06 c
II/6	6,76E-08 d	1,18E-06 c			
II/7	2,22E-06 c	3,95E-06 b			
II/8	7,24E-06 b	3,32E-06 b			
II/9	0,0001 a	5,29E-05 a			

A táblázat alapján a következőket állapíthatjuk meg:

Mind a desztillált víz, mind a kerozin esetében a legnagyobb hidraulikus vezetőképesség értéket a tiszta kvarchomoknál (a keveréksorok 9. eleme) mértük. A desztillált víz esetében az I. keveréksornál a vezetőképesség értékek növekedése megközelítőleg követi a - főként montmorillonitból álló - agyagtartalom-csökkenését. A II. keveréksornál a vezetőképesség-növekedés nem párhuzamos az agyagtartalom-növekedéssel. (A lösz komponens nem tartalmazó II/1. és II/4. minták vezetőképessége a legkisebb.)

Ha a két keveréksoron - desztillált vízzel - mért vezetőképesség értékeket együttesen vizsgáljuk, azt tapasztaljuk, hogy bár a legkisebb vezetőképesség érték az I. keveréksor 1. elemén (tiszta bentonit) volt mérhető és ezt követte a II. keveréksor 1. eleme, a továbbiakban azonos agyagtartalom mellett a II. keveréksor mintái igazolhatóan kisebb vezetőképességet mutattak. Ez a tapasztalat ellentmond az irodalmi adatoknak (MITCHELL, 1976), hiszen általános tapasztalat, hogy a montmorillonit-tartalmú agyagok, illetve az ezeket tartalmazó keverékek hidraulikus vezetőképessége a legkisebb. A jelenségre a magyarázatot a minták porfrakciójában mutatkozó különbségek adják meg. Bár az I. és II. keveréksor 2-6. eleme hasonló agyagtartalmú, a porfrakciók %-os aránya a II. keveréksor elemeiben lényegesen nagyobb (MAKÓ et al., 1995). Az agyag + portartalom együttes hatására a II. keveréksor mintáinak hidraulikus vezetőképességi értékei - az agyagásvány minőségbeli különbségek ellenére - kisebbek, mint az I. keveréksor megfelelő elemeinél mért értékek.

A kerozinnal mért hidraulikus vezetőképesség értékek sorrendje az egyes keveréksorokon belül, illetve a két keveréksort együttesen vizsgálva nagyfokú eltérést mutat a desztillált vízzel végzett méréseknél tapasztaltaktól.

Bár a legnagyobb vezetőképességet itt is a keveréksorok nagy homoktartalmú 7-9. eleme mutatja, a sorban utánuk következik, tőlük szignifikánsan nem, vagy alig különbözik a keveréksorok 1., legnagyobb agyagtartalmú eleme. Ez a tapasztalat egybevág az irodalomban leírtakkal (BUDHU et al., 1991). Eszerint apoláros szerves folyadékokkal telített nagy agyagtartalmú talajok ezen folyadékokkal mért hidraulikus vezetőképessége a homoktalajokéval összevethető - a folyadékok hatására bekövetkező porozitásváltozások (flokulátumok kialakulása vagy diffúz kettősréteg vastagságának csökkenése) miatt.

Az I. keveréksor 2-5. elemét tekintve azt tapasztaljuk, hogy az agyagtartalom csökkenésével együtt csökken az átszivárgó folyadéknak - az agyagszerkezet átalakításán keresztül - a pórusviszonyokra kifejtett hatása, következésképpen - a desztillált víznél tapasztaltakkal ellentétben - ebben a tartományban az agyagtartalom csökkenése a hidraulikus vezetőképesség csökkenését vonja maga után. (Hasonló hatás a II. talajkeveréksor esetében nem igazolható.)

A keveréksorok 6. eleménél az alacsony agyag- és magas homoktartalom együttes hatására ismét megnövekszik a vezetésre alkalmas nagyobb pórusok aránya és ez okozza a többi mintához képest viszonylag magas vezetőképességét.

Ha a két keveréksort együtt vizsgáljuk, azt tapasztaljuk, hogy - a desztillált vízzel történt mérésekhez hasonlóan - a kaolinit-tartalmú II. keveréksor elemei nagyobb vezetőképességűek, mint az I. keveréksor megfelelő agyagtartalmú elemei. A látszólagos ellentmondás itt is a porfrakciók közötti különbségekkel magyarázható.

A két folyadékkal mért vezetőképesség értékeket összehasonlítva azt látjuk, hogy a nagy homoktartalmú mintákban (I-II/8-9.) a desztillált vízre mért vezetőképesség a nagyobb. Jól egyeznek a tapasztaltak a durva porózus közegre leírt törvényszerűségekkel (KOZENY, 1927): a hidraulikus vezetőképesség a folyadékok viszkozitásával fordított, a fajlagos tömegével egyenes arányosságot mutat (MAKÓ et al., 1995). Az agyagos mintákra ez a törvényszerűség nem érvényes; az I-II/1-7. minták esetében a kerozinra mért vezetőképesség a nagyobb.

A 2. táblázatban a különféle talaj- és kőzetmintákon mért hidraulikus vezetőképesség értékek átlagait hasonlítottuk össze folyadékonként (a táblázat egy-egy oszlopa), illetve a különböző folyadékokkal mért vezetőképességet mintánként (a táblázat egy-egy sora). A hidraulikus vezetőképesség értékek melletti kisbetűk a táblázat egyes oszlopain belüli összehasonlításra szolgáló Duncan-teszt jelölései, míg a nagybetűk az egyes sorokon belüli összehasonlításra szolgálnak (lásd a keveréksoroknál leírtakat).

2. táblázat
A hidraulikus vezetőképesség mérések eredményei
(talaj- és ásványi őrlemény minták)

(1) Min- ta jele	(2) Hidraulikus vezetőképesség (m/s)			
	(3) Desztillált víz	(4) Kerozin	(5) Gázolaj	(6) Kőolaj
KI	3,60E-08 i D	2,35E-05 b A	4,09E-06 b B	3,78E-07 ac C
KA	-	4,30E-06 d A	4,08E-07 f B	1,15E-08 ef C
NA	1,79E-07 e C	1,23E-06 h A	3,25E-07 g B	7,55E-09 f D
SZ	2,80E-07 d C	1,59E-06 g A	7,10E-07 e B	2,77E-08 def D
UD1	1,01E-07 f B	2,49E-07 j A	1,43E-07 h AB	6,74E-08 bd B
UD2	4,43E-08 h C	2,56E-07 j A	1,51E-07 h B	1,11E-07 b B
UD3	6,39E-08 g C	1,71E-06 g A	7,69E-07 e B	3,51E-08 bde D
UD4	1,75E-07 e A	-	-	6,18E-08 bd B
AQ1	8,03E-07 c C	5,17E-06 c A	2,37E-06 c B	5,51E-08 bde D
AQ2	1,38E-08 k C	1,14E-06 hi A	4,20E-07 f B	1,58E-08 def C
BE	8,25E-09 l D	9,26E-07 i A	4,82E-07 f B	2,55E-08 bdef C
KAO	1,63E-08 k C	3,00E-06 ef A	2,00E-06 dc A	7,76E-08 bcd B
IL	3,16E-08 hij B	2,51E-06 f A	1,75E-06 d A	3,19E-08 bdef B
LO	2,22E-06 b B	3,95E-06 de A	2,24E-06 dc B	9,70E-08 bcd C
HO	1,00E-04 a A	5,29E-05 a B	3,14E-05 a C	1,65E-06 a D

Az egytényezős variancia-analízisek eredményei közül az alábbiakat emeljük ki:

A talajkeveréksorokhoz hasonlóan a vizsgált minták közül is a tiszta kvarchomok (HO) hidraulikus vezetőképessége volt - az összes folyadékra mérve - a legnagyobb.

A desztillált vízzel történt méréseknél a kis agyagtartalmú lösz (LO) és az AQ1 jelű (Arenosol) minta vezetőképessége 2-3 nagyságrenddel kisebb értékkel követte a homoknál mért értéket. A nagy agyagtartalmú ásványi őrlemények (BE, KAO, IL), valamint a kisújszállási réti agyag talaj (KI) vezetőképessége volt a legalacsonyabb. A karcagi szikes talaj (KA) esetében desztillált vízzel nem történt mérés; a magas Na^+ -tartalmú talaj vízzel való teljes telítése a rendelkezésünkre álló idő alatt és a használt módszerrel kivihetetlennek bizonyult.

Az AQ2 jelű tengerparti szoloncsák talaj vezetőképessége szintén nagyon alacsony volt - a kaolin mintáénál kisebb. Ezt a tapasztalatot nem magyarázza sem a minta agyag-, sem pedig portartalma. Oka feltehetően a viszonylag nagy (0,15 %) sótartalomban keresendő.

A kerozinnal és gázolajjal végzett mérések lényegében egymáshoz hasonló eredményekre vezettek. Mindkét esetben a nagy agyagtartalmú, KI jelű mintán mértük a homok után a legnagyobb hidraulikus vezetőképességi értékeket. Ez nem magyarázható azonban kizárólag az apoláros folyadékok hatására az agyagminőségben bekövetkezett változással (flokkuláció vagy kettősréteg csökkenés), hiszen a nálánál nagyobb agyagtartalmú és kb. hasonló homoktartalmú minták (BE, KAO, IL) hidraulikus vezetőképessége alacsonyabb volt. A tényleges magyarázatot a minta erősebb aggregáltsága kínálja. A szerves (humusz % = 3,71) és szervesetlen kolloidokban gazdag minta - a KA jelű (humusz % = 2,05) mintához hasonlóan - a többi mintánál lényegesen szerkezetesebb maradt a mintaelőkészítés után is. A szerves folyadékok a telítés és átszivárgás alatt az aggregátumokat nem, vagy csak részben voltak képesek szétiszapolni. Az aggregátumok közötti pórustérben ezáltal a kerozin és gázolaj (és a kőolaj) számára gyorsabb mozgásra nyílt lehetőség.

Hasonló a tapasztalat az UD3 jelű minta esetében is. Hidraulikus vezetőképesség értéke a jóval könnyebb fizikai féleségű (nagyobb homoktartalmú) SZ jelű (csernozjom) talajéhoz hasonlítható. Itt a magyarázatot szintén a minta nagyfokú szerkezetessége nyújtja, mely szerkezetességnek az oka nemcsak a nagy humusztartalom, hanem a nagy mennyiségben jelenlévő vaskolloidok koaguláló hatása (Terra rossa típusú talaj).

A kerozin, a gázolaj és a kőolaj esetében megfigyelhető a nagy agyagtartalmú minták hidraulikus vezetőképességének nagyarányú növekedése, ám a talajkeveréksoroknál tapasztaltakhoz képest a talaj- és ásványi őrlemény mintáknál az agyagszerkezet átrendeződésének a vezetőképesség megváltozására gyakorolt hatását elnyomja vagy módosítja a talaj szerkezetessége. Ezzel magyarázható, hogy a szerkezet nélküli, finomra őrölt ásványi anyagok (BE, KAO, IL) vezetőképessége az apoláros folyadékokra a szerkezetes talajokhoz képest kicsi.

Ugyanakkor nagyobb, mint a szerkezet nélküli, kis agyag- és humusztartalmú (humusz % = 0,72-0,74) UD1 és UD2 jelű talajmintáké.

A kőolaj esetében a mintákon mért hidraulikus vezetőképesség értékek nagy része szignifikánsan nem különbözik egymástól, illetve az igazolható eltérések is nehezen értelmezhetők. A méréseinkhez beszerezhető és a vizsgálatokba vont kőolaj sok üledéket tartalmazott, melynek kiülepedettsége is eltérő volt a mérések folyamán. Az egyes mérési időpontokban jelentősen eltérő vezetőképesség értékeket tudtunk mérni, sőt az egyes méréseken belül a különböző folyadékoszlop magasságoknál is eltért a vezetőképesség. Ennek magyarázatát abban látjuk, hogy a folyadékminta finom üledéke fokozatosan eltömte a talaj- és ásványi őrlemény minták folyadékvezetésre alkalmas pórusait. Ezek között a mérési körülmények között a kőolajra mért vezetőképességi értékek csak tájékoztató jellegűeknek tekinthetők.

Ha az egyes talaj- és ásványi őrlemény mintákon a különböző folyadékokkal mérhető hidraulikus vezetőképességet hasonlítjuk össze, lényegében a talajkeveréksoroknál tapasztaltakhoz hasonlóak a tendenciák. A tiszta kvarchomoknál tisztán érvényesül a viszkozitással való fordított és a fajlagos tömeggel való egyenes arányosság. A nagy agyagtartalmú mintákban az apoláros folyadékokra nézve általában lényegesen nagyobb a vezetőképesség értéke. Az egyes apoláros folyadékok között a kevésbé viszkozus kerozinra mért vezetőképesség a legnagyobb, a leginkább viszkozus kőolajra mért vezetőképesség a legkisebb.

Többszörös variancia-analízissel vizsgáltuk a talajkeveréksorokon a folyadék minőség, agyagásvány minőség és a tömődöttség hatását a hidraulikus vezetőképességre. (A számítások során a hidraulikus vezetőképesség értékek logaritmusával dolgoztunk.)

A kétféle keveréksoron, kétféle folyadékkal mért vezetőképesség értékeket közös adatállományként vizsgálva kimutatható volt mind a folyadékok minősé-

3. táblázat
A talajkeveréksorok hidraulikus vezetőképességének többszörös
variancia-analízise

(1) Tényező	(2) SQ	(3) FG	(4) MQ
a) Folyadék	4	1	4***
b) Agyagásvány minőség	11,42	2	5,71***
c) Folyadék x agyagásvány minőség	9,64	2	4,82***
d) Térfogattömeg	34,52	10	3,45***
e) Hiba	12,48	329	0,04

***P = 0,1%

gének, mind pedig a minták agyagásvány-féleségének és tömődöttségének a vezetőképesség értékek alakulására gyakorolt hatása ($P = 0,1\%$) (3. táblázat). A táblázatból kitűnik, hogy igazolható volt a folyadék minőség és az agyagásvány-féleség együttes hatása is, ami arra utal, hogy a különböző agyagásványokat tartalmazó minták pórustere nem egyformán változik meg, ha változik az át-szivárgó folyadék minősége.

Ugyanakkor - a keveréksorok esetében - nem tudtuk kimutatni a különféle ismétléstípusok hatását a mért hidraulikus vezetőképesség értékekre, ami azt jelzi, hogy az egytényezős variancia-analízissel összehasonlított hidraulikus vezetőképességi értékek átlagai jól jellemzik az adott mintákat.

Hasonlóképpen vizsgáltuk a minták agyagásvány-összetételének, tömődöttségének és a folyadékok minőségének hatását a talaj- és ásványi őrlemény mintákon négyféle folyadékkal mért hidraulikus vezetőképességre. $P = 0,1\%$ -os valószínűségi szinten igazolható volt a folyadék minőség, az agyagásvány minőség, illetve ezek együttes hatása. A tömődöttség hatása ugyancsak $P = 0,1\%$ -os szinten igazolható volt. Az agyagásvány minőséget és a térfogattömeget leíró kódok között azonban a vizsgált mintákon szoros kapcsolatot találtunk, így e két paraméter hatása nem elkülöníthető (4-5. táblázat).

A talajkeveréksorokhoz hasonlóan a talaj- és ásványi őrlemény mintáknál is megvizsgáltuk a különböző ismétléstípusok hatását a mérési eredményekre. A

4. táblázat

A talaj- és ásványi őrlemény minták hidraulikus vezetőképességének
többtényezős variancia-analízise (I.)

(1) Tényező	(2) SQ	(3) FG	(4) MQ
a) Folyadék	110,48	3	36,83***
b) Agyagásvány minőség	91,2	5	18,24***
c) Folyadék x agyagásvány minőség	76,11	15	5,07***
d) Hiba	191,73	900	0,2

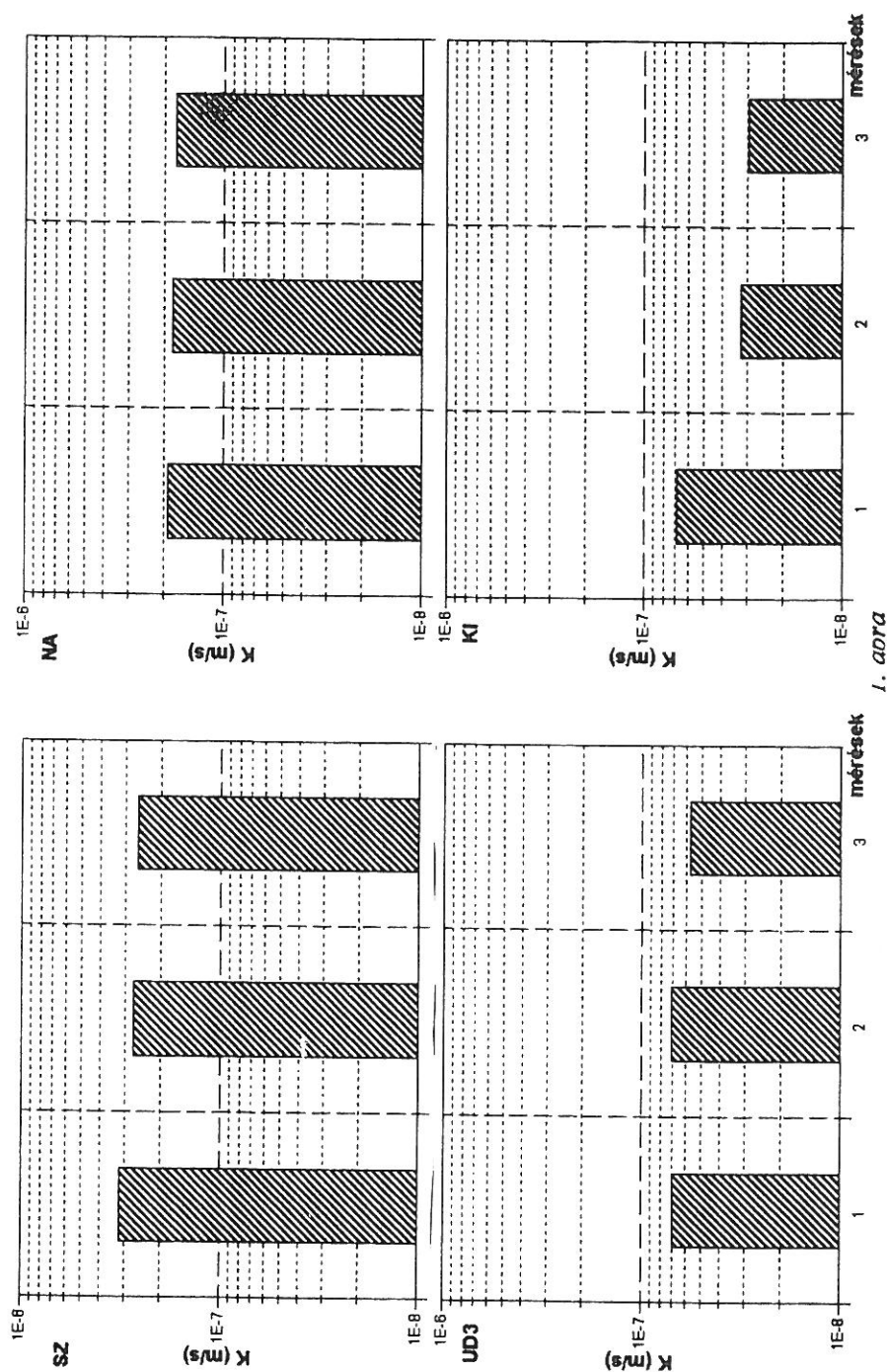
*** $P = 0,1\%$

5. táblázat

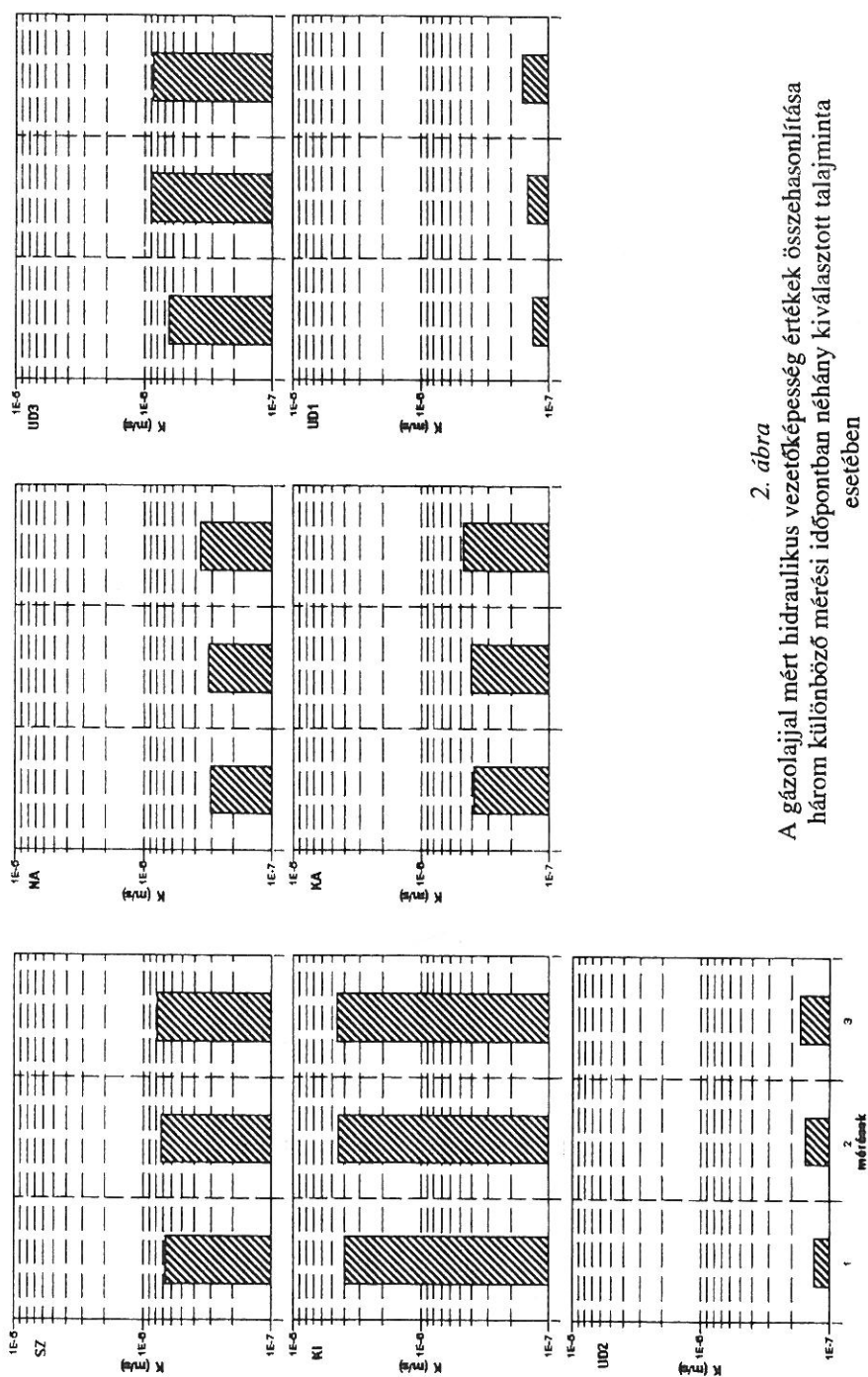
A talaj- és ásványi őrlemény minták hidraulikus vezetőképességének
többtényezős variancia-analízise (II.)

(1) Tényező	(2) SQ	(3) FG	(4) MQ
a) Folyadék	232,8	3	77,6***
b) Térfogattömeg	19,58	10	1,96***
c) Hiba	193,56	884	0,22

*** $P = 0,1\%$

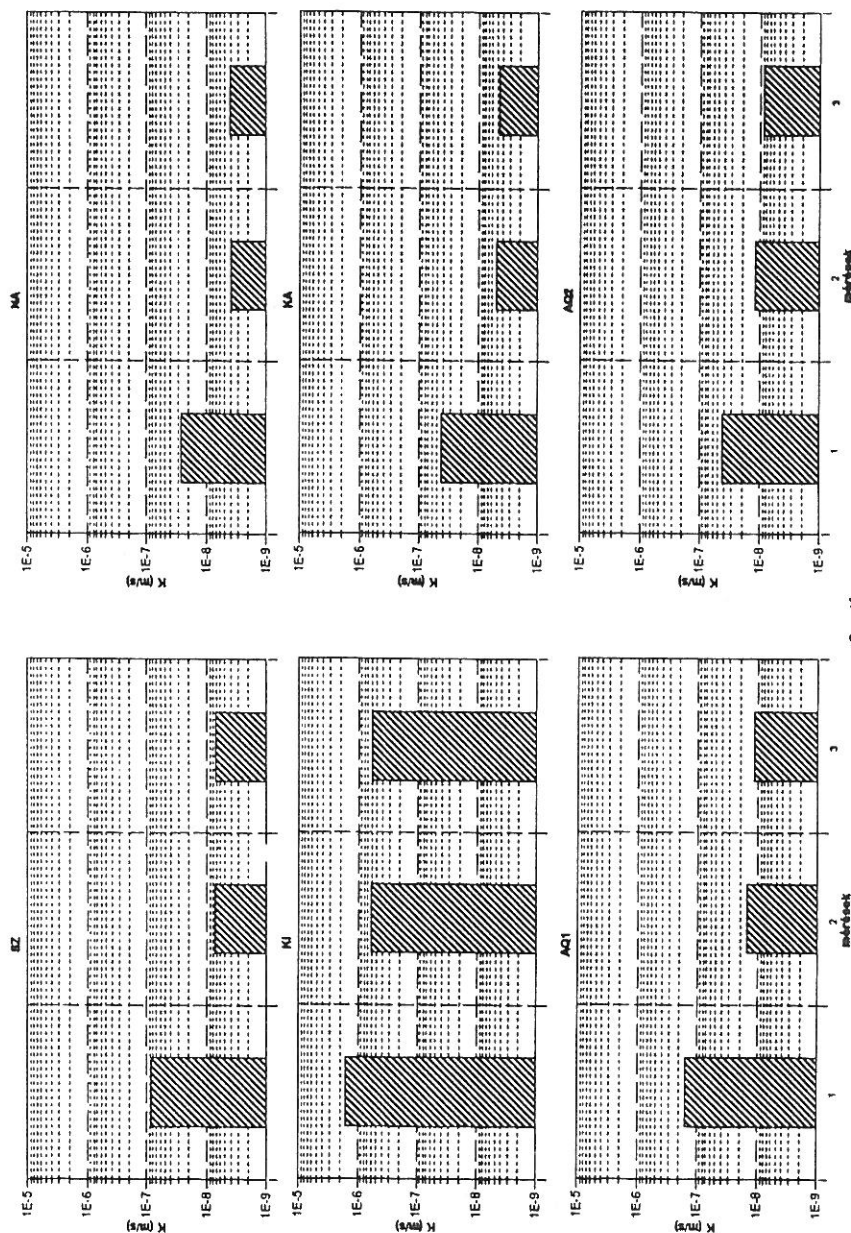


A desztillált vízzel mért hidraulikus vezetőképesség értékek összehasonlítása három különböző mérési időpontban néhány kiválasztott talajmintá esetében



2. ábra

A gázolajjal mért hidraulikus vezetőképesség értékek összehasonlítása három különböző mérési időpontban néhány kiválasztott talajminta esetében



3. ábra

A kőolajjal mért hidraulikus vezetőképesség értékek összehasonlítása
három különböző mérési időpontban néhány kiválasztott talajminta
esetében

négy különféle folyadékkal mért hidraulikus vezetőképesség értékeket együtt vizsgálva azt találtuk, hogy a "mintaismétlések" (3-3 db azonos mintából álló talajoszlop) $P = 1$ %-os, a "mérésismétlések" (egy-egy oszlopon végzett 3-3 mérés) $P = 5$ %-os és a "magasságismétlések" (egy-egy mérés során 3-3 különböző folyadékoszlop magasságra számolt érték) $P = 10$ %-os valószínűséggel hatottak a vezetőképesség értékek alakulására. Hogy értelmezhezzük ezt a tapasztalatot, folyadékonként külön-külön is megvizsgáltuk az ismétlések hatását.

A desztillált víz, kerozin és gázolaj esetében a "mintaismétlések" és a "magasságismétlések" hatását nem tudtuk igazolni. A kerozin és a gázolaj esetében a "mérésismétlések" hatása sem volt igazolható.

A desztillált víznél a "mérésismétlések" hatása $P = 5$ %-os szinten szignifikánsnak bizonyult, alátámasztva azt a tapasztalatunkat, hogy a talajoszlopok vezetőképessége időben általában csökkent (1. ábra). Ez feltételezhetően a talaj szerkezeti elemeinek a mérés folyamán történő folyamatos szétesésével, az eliszapolódott részecskék vándorlásával, a pórusok eltömítésével magyarázható.

A gázolajnál - bár a "mérésismétlés" hatása a hidraulikus vezetőképességre az összes mintát tekintve nem volt igazolható, megfigyeltük, hogy az idő előrehaladtával bizonyos mintákon kismértékben növekedett a vezetőképesség (2. ábra). Ugyanakkor megfigyelhető volt, hogy a gázolajjal a talajoszlopokból a finomabb frakció egy része kimosódott. Az ezáltal megnövekedett pórusméret okozhatta a kismértékű vezetőképesség-növekedést.

A kőolaj esetében a "mintaismétlés" hatása $P = 1$ %-os, a "mérésismétlésé" $P = 5$ %-os, a "magasságismétlés" $P = 0,1$ %-os valószínűséggel igazolható volt. Utóbbi kettőt magyarázza - a már említett - kőolaj-üledék pórusokat eltömítő hatása, ami a vezetőképességnek az időben történő nagymértékű csökkenését okozta (3. ábra). Az a tény pedig, hogy az azonos mintákkal töltött talajoszlopokban ("mintaismétlés") szignifikánsan eltérő hidraulikus vezetőképesség értékeket mértünk a kőolajjal (és, hogy a többi folyadék esetében ilyen nem tapasztaltunk) a vizsgálatba vont kőolaj inhomogenitására (különböző üledék-tartalmak) utal.

Összefoglalás

A talajokat szennyező kőolajszármazékok mozgását leíró modellek kísérleti adatbázisának bővítése és esetleges újabb törvényszerűségek feltárása céljából kísérletsorozatot végeztünk, melynek során különböző ásványi őrlemény- és talajmintákon, valamint ezekből előállított keveréksorozatok mintáin mértük a hidraulikus vezetőképességet desztillált vízzel, kőolajjal és két kőolajszármazékkal.

Tapasztalataink az alábbiakban foglalhatók össze:

- Az agyagfrakció mennyiségében megegyező, de eltérő agyagásvány-összetételű és a porfrakció mennyiségében különböző minták hidraulikus vezető-

képessége a porfrakció mennyiségi változását követte és kevésbé függött az agyagásvány-összetételtől.

- A szerves folyadékokkal telített nagy agyagtartalmú talajok szerves folyadékokkal mért vezetőképessége - az agyagszerkezet átrendeződése következtében - a homoktalajokéhoz volt hasonló. A mintákat összehasonlítva, az agyagtartalom csökkenésével átmenetileg csökkent, majd a homoktartalom százalékos növekedésével újból megnövekedett a vezetőképesség.

- Statisztikailag igazolható volt a folyadékok minőségének és az agyagásványok minőségének a hidraulikus vezetőképességre gyakorolt együttes hatása.

- Csupán a szerkezet nélküli ásványi őrleményekben és altalajokban, illetve a leromlott szerkezetű talajoknál tekinthetők érvényesnek a fenti megállapítások. Ugyanakkor szerkezetes talajokban az aggregálódás mértéke volt az a tényező, amely alapvetően meghatározta a minták szerves folyadékokra mérhető hidraulikus vezetőképességét. A tanulmányozott szerves folyadékok esetében ugyanis a folyadékokkal való telítés és a mérések során a - mintaelőkészítés során megmaradó, kisméretű - aggregátumok (a desztillált víznél tapasztaltakkal ellentétben) nem iszapolódtak szét; az aggregátumok közötti pórusterben a szerves folyadékok lényegesen gyorsabb mozgására nyílt lehetőség.

- A nagy homoktartalmú talajokat kivéve az egyes mintáknál a különböző folyadékokkal mért hidraulikus vezetőképességek sorrendje nem követte a fajlagos tömeg és viszkozitási értékek alapján várható sorrendet.

- A desztillált vízzel és kőolajjal végzett mérések során a hidraulikus vezetőképesség időbeni csökkenését, a gázolajjal történt vizsgálatoknál időbeni növekedését tapasztaltuk.

Irodalom

- ALPEROVITCH, N., SHAINBERG, I. & KEREN, R., 1985. Effect of clay mineralogy and aluminium and iron oxides on the hydraulic conductivity of clay - sand mixtures. *Clays and Clay Minerals*. 33. 443-450.
- BAVER, L. D., 1959. *Soil Physics*. Wiley & Sons. New York.
- BENSON, C. H., ZHAI, H. & WANG, X., 1994. Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. 120. 366-387.
- BOYNTON, S. S. & DANIEL, D. E., 1985. Hydraulic conductivity tests on compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. 111. 465-478.
- BUDHU, M. et al., 1991. The permeability of soils with organic fluids. *Canadian Geotechnical Journal*. 28. 140-147.
- CARY, J. W., SIMMONS, C. S. & MCBRIDE, J. F., 1989. Predicting oil infiltration and redistribution in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53. 335-342.
- ESSAID, H. I., HERKELRATH, W. N. & HESS, K. M., 1993. Simulation of fluid distributions observed at a crude oil spill site incorporating hysteresis, oil entrapment, and spatial variability of hydraulic properties. *Water Resources Research*. 29. 1753-1770.

- FAUST, C. R., GUSWA, J. H. & MERCER, J. W., 1989. Simulation of three-dimensional flow of immiscible fluids within and below the unsaturated zone. *Water Resources Research*. **25**. 2449-2464.
- FIREMAN, M., 1944. Permeability measurements on disturbed soil samples. *Soil Sci.* **58**. 337-353.
- GAL, M., WHITTIG, L. D. & FABER, B. A., 1990. Influence of clay on water movement in coarse-textured soils. *Clays and Clay Minerals*. **38**. 144-150.
- GARCIA-BENGOCHEA, I., LOWELL, C. W. & ALTSCHAEFFL, A. G., 1979. Pore distribution and permeability of silty clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE*. **105**. 839-856.
- GILLIGAN, E. D. & CLEMENCE, S. P., 1984. Fabric and engineering behavior of organic-saturated clays. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*. **21**. 515-529.
- HEAD, K. H., 1984. *Manual of Soil Laboratory Testing*. Vol. 2. Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. Pentech Press. London.
- HEIJDE, VAN DER P. K. M., 1994. Identification and Compilation of Unsaturated/Vadose Zone Models. US EPA. EPA/600/R-94/028.
- HILLEL, D., 1971. *Soil and Water*. Academic Press. New York.
- KALUARACHCHI, J. J. & PARKER, J. C., 1989. An efficient finite element method for modeling multiphase flow. *Water Resources Research*. **25**. 43-54.
- KLUTE, A. & DIRKSEN, C., 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: *Methods of Soil Analysis*. (Eds.: KLUTE, A. et al.) 687-734. American Society of Agronomy. Madison, Wisc.
- KOZENY, J., 1927. Über kapillare Leitung des Wassers im Boden. *Wiener Akademie Wissenschaft*. **136** (2a) 271.
- KUEPER, B. H. & FRIND, E. O., 1991. Two-phase flow in heterogeneous porous media. 2. Model application. *Water Resources Research*. **27**. 1059-1070.
- LENHARD, R. J. et al., 1988. Measurement and simulation of one-dimensional transient three-phase flow for monotonic liquid drainage. *Water Resources Research*. **24**. 853-863.
- MAKÓ, A., 1993. The examination of the motion of hydrocarbon contamination in different soils. First International Conference. *Environmental Engineering*. Leicester, 21-22 Sept. 1993.
- MAKÓ A. et al., 1995. Szénhidrogének gőzadszorpciója különféle talajokon. *Agrokémia és Talajtan*. **44**. 153-180.
- MITCHELL, J. K., 1976. *Fundamentals of Soil Behavior*. Wiley & Sons. New York.
- MITCHELL, J. K., HOOPER, D. & CAMPANELLA, R., 1965. Permeability of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE*. **91**. 41-65.
- PALMER, C. D. & JOHNSON, R. L., 1989. Physical processes controlling the transport of non-aqueous phase liquids in the subsurface. In: *Transport and Fate of Contaminants in the Subsurface*. US EPA. EPA/625/4-89/019. 23-27.
- PANTAZIDOU, M. & SITAR, N., 1993. Emplacement of nonaqueous liquids in the vadose zone. *Water Resources Research*. **29**. 705-722.
- TAVENAS, F. et al., 1983. The permeability of natural soft clays. Part 1. Methods of laboratory measurement. *Canadian Geotechnical Journal*. **20**. 629-644.
- TESTA, S. M. & PACZKOWSKI, M. T., 1989. Volume determination and recoverability of free hydrocarbon. *Ground Water Monitoring Review*. **9**. 120-128.

- TESTA, S. M. & WINEGARDNER, D. L., 1991. Restoration of Petroleum-contaminated Aquifers. Lewis Publishers. Chelsea, Michigan.
- YONG, R. N., MOHAMED, A. M. O. & WARKENTIN, B. P., 1992. Principles of Contaminant Transport in Soils. Elsevier. Amsterdam.
- UPPOT, J. O. & STEPHENSON, R. W., 1989. Permeability of clays under organic permeants. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. **115**. 115-131.
- US EPA, 1993. Subsurface Characterization and Monitoring Techniques: A Desk Reference Guide. Vol. I-II. EPA/625/R-93/003a-b.
- VÁRALLYAY Gy., 1972. A Magyar Alföld szikes talajainak hidraulikus vezetőképessége. *Agrokémia és Talajtan*. **21**. 57-88.
- VÁRALLYAY Gy., 1973. Berendezés bolygatatlan szerkezetű talajoszlopok hidraulikus vezetőképességének meghatározására. *Agrokémia és Talajtan*. **22**. 23-36.
- VÁRALLYAY Gy., 1993. A vízzel telített (kétfázisú) talaj hidraulikus vezetőképességének (K) meghatározása. In: Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerek könyv 1. A talaj fizikai, vízgazdálkodási és ásványtani vizsgálata. (Ed.: BUZÁS I.) 187-204. INDA Kiadó. Budapest.
- WEAVER, J. W. et al., 1994. The Hydrocarbon Spill Screening Model (HSSM). Vol. 2. Theoretical Background and Source Codes. US EPA. EPA/600/R-94/039b.

Érkezett: 1995. január 21.

Hydraulic Conductivity of Soils Saturated with Organic Liquids. I. Comparative Analyses

A. MAKÓ

Pannon University of Agricultural Sciences, Keszthely (Hungary)

Summary

In order to expand the experimental data base of models describing the movement of petroleum derivatives polluting the soil and possibly to discover new correlations, a series of experiments was set up in which the hydraulic conductivity of various ground minerals and soils and of samples created from a series of mixtures of these was measured using distilled water, kerosene, diesel oil and petroleum. The measurements were carried out on artificial soil columns in glass cylinders using the decreasing water pressure method. Three columns were created for each sample ("measurement replication") and three hydraulic conductivity measurements were made on each soil column ("measurement replication"). To this end the liquid feed tube was refilled to the maximum level and the reduction in the liquid level per unit time was measured. Each measurement involved the recording of three liquid level reductions and time differences ("height replication").

The hydraulic conductivity values calculated on the basis of the measurements were evaluated using single factor variance analysis (Duncan test). The effect of liquid quality, clay mineral quality and compactness on the hydraulic conductivity was examined using multifactorial variance analysis. Finally, studies were made on how the various "replication types" influenced the results of the measurements.

The conclusions can be summarised briefly as follows:

- The hydraulic conductivity of samples with the same quantity of clay fraction, but with a different clay mineral composition and quantity of powder fraction followed quantitative changes in the powder fraction and was less dependent on the clay mineral composition.
- For soils with a large clay content and saturated with organic liquids the conductivity measured with organic liquids was similar to that of sandy soils due to the rearrangement of the clay structure. A comparison of the samples shows that the conductivity decreased temporarily with a reduction in the clay content, then rose again as the percentage sand content increased.
- The joint effect of liquid quality and clay mineral quality on the hydraulic conductivity was statistically significant.
- The above findings are only valid for non-structured ground minerals and subsoils and for soils in which the structure has been destroyed. At the same time, in structured soils the degree of aggregation was the factor which fundamentally determined the hydraulic conductivity measured in the case of organic liquids.
- With the exception of soils with a high sand content, the order of hydraulic conductivity measured with different liquids in the various samples did not follow the order expected on the basis of specific mass and viscosity values.
- In the course of measurements involving distilled water and petroleum a temporary drop in hydraulic conductivity was observed, which can be attributed to the

sedimentation of structural elements (Fig. 1). A temporary reduction in conductivity was also caused by the large sediment content of petroleum (Fig. 3). In studies involving diesel oil, however, a slight increase in conductivity was observed with time, which can be explained by the fact that part of the fine fraction was leached out with the diesel oil in the course of the measurements (Fig. 2).

Table 1. Results of measurements on hydraulic conductivity (soil mixture series). (1) Sample code. (2) Hydraulic conductivity (m/s). (3) Distilled water. (4) Kerosene. A. I. soil mixture series. B. II. soil mixture series. C. I-II. soil mixture series.

Table 2. Results of measurements on hydraulic conductivity (soil and ground mineral samples). (1) Sample code. (2) Hydraulic conductivity (m/s). (3) Distilled water. (4) Kerosene. (5) Diesel oil. (6) Petroleum.

Table 3. Multivariable variance analysis on the hydraulic conductivity of the soil mixture series. (1) Factor. a) Liquid; b) Clay mineral quality; c) Liquid x clay mineral quality; d) Volume mass; e) Error.

Table 4. Multivariable variance analysis on the hydraulic conductivity of the soil and ground mineral samples (I). (1) Factor. a-c) See Table 3; d) Error.

Table 5. Multivariable variance analysis on the hydraulic conductivity of the soil and ground mineral samples (II). (1) Factor. a) Liquid; b) Volume mass; c) Error.

Fig. 1. Comparison of hydraulic conductivity values measured using distilled water at three different measuring times in the case of selected soil samples.

Fig. 2. Comparison of hydraulic conductivity values measured using diesel oil at three different measuring times in the case of selected soil samples.

Fig. 3. Comparison of hydraulic conductivity values measured using petroleum at three different measuring times in the case of selected soil samples.